

V-9 舗装体の二次元の熱応力に関する研究(第4報)

北海道大学 工学部 学生員 ○ 織笠光明
 正員 深井一郎
 森吉昭博
 菅原照雄

1. まえがき

寒冷地におけるアスファルト舗装において、特に横方向と縦断方向の亀裂現象が多く報告されている。これらの亀裂現象の破壊のメカニズムは、現在の所全く不明であり、その解明が急がれている。一部の研究者は、アスファルト舗装の表面から深さ方向に亀裂が次第に進行していくと考えている。しかしながら、この亀裂の進行の状態は現場で確認をしておらず、その仮定はいまだ証明されていない。このため、亀裂が生じたアスファルト舗装の補修の方法も確立していないのが現状である。本研究はこれらのことを考慮して、アスファルト舗装が外気温の変動に伴い、内部に生ずる熱応力により縦断方向の亀裂を生ずる過程を舗装のモデルを使って検討した。使用した舗装のモデルは図-1に示すような構造であり、これは一般国道で、雨水桧と歩道を有する片道一車線の道路を対象としている。著者らの研究によると、アスファルト混合物が熱応力により破壊する時の強度は(20~30) Kg/cm^2 であることが確認されている。このため、ここでは主応力 $20 \text{ Kg}/\text{cm}^2$ の値に達するとアスファルト混合物は破壊すると仮定した。計算の結果、アスファルト舗装が熱応力により破壊する時、必ずしも表面からではなく底面から壊れる可能性があることが確認された。

2. 解析法

使用舗装モデルは図-1、2に示すような構造であり、この舗装の下面には切込み砂利が35 cm、火山灰が55 cm、路床土98 cmあり、路床土の下面の湿度が 3°C で一定である。車道を中心線直下および歩道より50 cm離れた直下において、断熱であると仮定している。このモデルを使って舗装を有限要素に分割し、2次元の温度分布を差分を用いて計算した。熱応力の計算の際、舗装底面の境界状態は図-3~5の3ケースを想定した。中心線直下では、ローラ支持、歩道の端部では自由な境界条件とした。計算に用いた外気温は図-6に、またアスファルト混合物の力学性状は図-7~8に示す。一方、使用した材料の物理性状は表-1に示す。

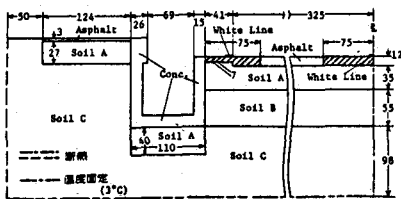


図-1 想定した舗装構造のモデル

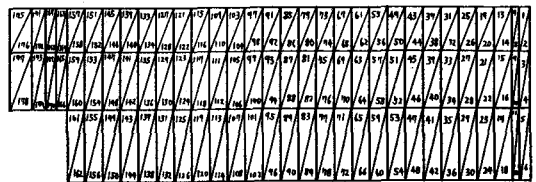


図-2 舗装構造の分割モデル

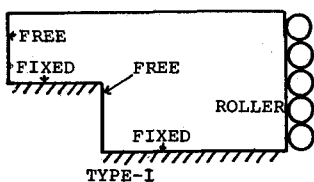


図-3 境界条件 (タイプ1)

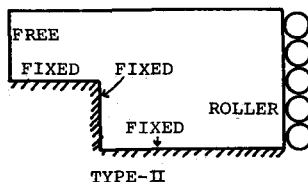


図-4 境界条件 (タイプ2)

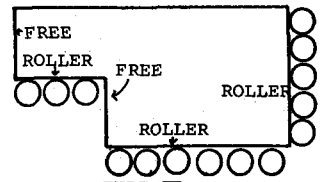


図-5 境界条件 (タイプ3)

表-1 舗装体の構成材料の材料物性

物理性 材料名	表面熱伝達率 (Kcal/m ² h ^{1/2} °C)	熱伝導率 (Kcal/mh ^{1/2} °C)	比熱 (Kcal/Kg°C)	密度 (g/cm ³)	弾性係数 (Kg/cm ²)	線膨張係数 (1/°C)	ポアソン比
アスファルト	5.0	0.9	0.21	2.3	1.94×10 ⁵	2.51×10 ⁻⁵	0.35
コンクリート	5.0	1.7	0.30	2.4	-	-	-
Soil A (切込石利)	-	2.1	0.20	2.0	-	-	-
Soil B (CK山灰)	-	0.99	0.20	0.95	-	-	-
Soil C (路床土)	5.0	1.0	0.30	1.0	-	-	-
白線	5.0	-	-	-	-	-	-

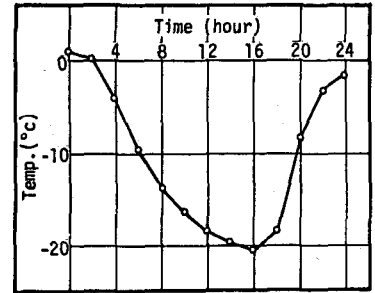


図-6 美々で観測された外気温
(48年12月6日～48年12月7日)

図-1に示す舗装構造モデルが図-6の外気温の変化を受けた時、表-1の物理性状を用いて舗装体内部の温度分布が計算される。この温度分布を利用し、アスファルト混合物の応力・歪関係が線形で、時間温度の重ね合せが可能、且つその体積弾性係数が一定、均質等方性物質であると仮定すると、各要素の釣合の方程式はバクトル表示すると次のようになる。

$$(K_1 + [G(0) - G(\xi_k - \xi_{k-1})]K_2) \phi(t_k) = H(t_k) + V(t_k) \quad \dots (1)$$

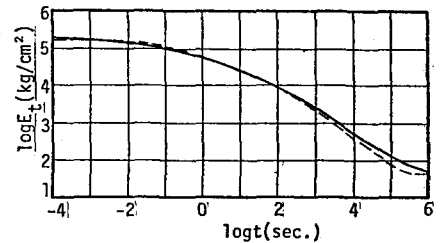


図-7 アスファルトコンクリートの緩和弾性率とその近似曲線

ここで、 G : 緩和弾性率、 H : 温度的荷重、 K_1 : $\phi^T \mathbb{C} \phi$,

$$K_2 = \frac{1}{6} \phi^T \begin{bmatrix} -4 & 2 & 0 \\ 2 & -4 & 0 \\ 0 & 0 & -3 \end{bmatrix} \phi, \quad t_k: \text{実時間}$$

ϕ は係数マトリックスで、 $\xi(t) = \phi \eta(t)$ をみたす。 ξ : u のみ、 η : 変位、 ξ : シフト量、 $\xi = \xi(t) = \int_0^t 10^{\alpha(T_m(t'))} dt'$, $H = 3K\alpha T_m \phi^T \mathbb{I}$, ここで T_m : 要素の重心の温度、 α : 線膨張係数、 $\mathbb{I} = [1 \ 1 \ 0]^T$

$$\mathbb{C} = \begin{bmatrix} K + 4/3 G(0) & K - 2/3 G(0) & 0 \\ K - 2/3 G(0) & K + 4/3 G(0) & 0 \\ 0 & 0 & G(0) \end{bmatrix}$$

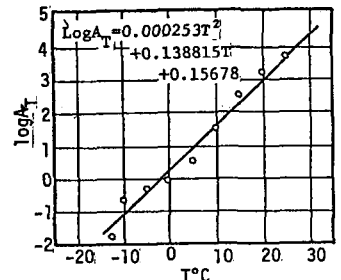


図-8 シフトマターと温度との関係

$$V(t_k) \text{ は記憶荷重で, } G \text{ を } G(t) = 1 + 1.2404e^{-10^{-3}t} + 8.6105e^{-10^{-6}t} + 50.653e^{-10^{-1}t} - 4.8921e^{-10^{-5}t} + 586.98e^{-10^{-9}t} + 2656.3e^{-10^{-3}t} + 13782e^{-10^{-2}t} + 16818e^{-10^{-1}t} + 48305e^{-10^{-1}t} + 32065e^{-10^{-1}t} + 71504e^{-10^{-1}t} - 17833e^{-10^{-3}t} = A_0 + \sum_{j=1}^5 A_j e^{-\lambda_j t} \text{ とすると,}$$

$$V(t_k) = -M \left(\sum_{j=1}^5 A_j \alpha_{j,k} + \frac{1}{2} [G(0) - G(\infty) - \sum_{j=1}^5 A_j e^{-\frac{(\xi_k - \xi_{k-1})}{\tau_j}}] \xi(t_{k-1}) \right) = M_p \text{ とする。}$$

$$\text{ここで, } \alpha_{j,k} = e^{-\frac{(\xi_k - \xi_{k-1})}{\tau_j}} \{ (1 - e^{-\frac{(\xi_{k-1} - \xi_{k-2})}{\tau_j}}) \xi(t_{k-2}) + \alpha_{j,k-1} \}, \quad \alpha_{j,1} = \alpha_{j,2} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\alpha_{j,3} = e^{-\frac{\xi_1}{\tau_j}} (e^{\frac{\xi_2}{\tau_j}} - 1) \xi^*(0), \quad M = \frac{1}{3} \phi^T \begin{bmatrix} -4 & 2 & 0 \\ 2 & -4 & 0 \\ 0 & 0 & -3 \end{bmatrix} \xi^*(t_k) = \frac{\xi(t_{in}) + \xi(t_k)}{2}$$

式(1)を全要素について組み立てて、全節点の変位を求め、次式から要素毎の応力を計算する。

$$\sigma(t_k) = \mathbb{S}_1 + \mathbb{S}_2 \xi(t_k) - 3K\alpha T_m \mathbb{I} \quad \dots (2)$$

$$\text{ここで, } \sigma = [\sigma_{xx} \ \sigma_{yy} \ \tau_{xy}]^T, \quad \xi = [\xi_{xx} \ \xi_{yy} \ \xi_{xy}]^T, \quad \mathbb{S}_1 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} -4 & 2 & 0 \\ 2 & -4 & 0 \\ 0 & 0 & -3 \end{bmatrix} P,$$

$$\underline{S}_2 = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} -4 & 2 & 0 \\ 2 & -4 & 0 \\ 0 & 0 & \pi^3 \end{bmatrix} [G(0) - G(\xi_2 - \xi_{2-1})] + C$$

3. 計算結果および考察

4. 境界条件と破壊との関係

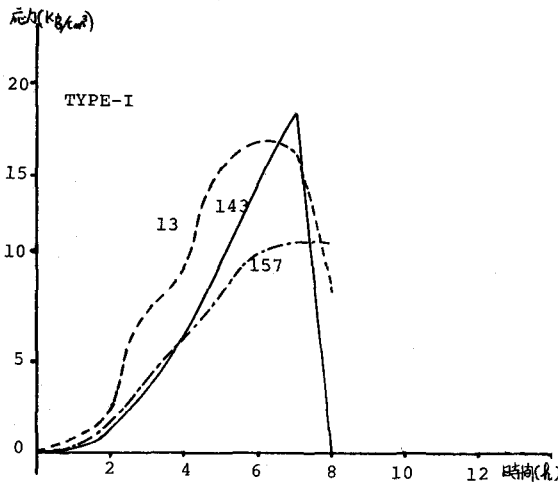


図-9 横断方向の応力の時間変化 (タイプ1)

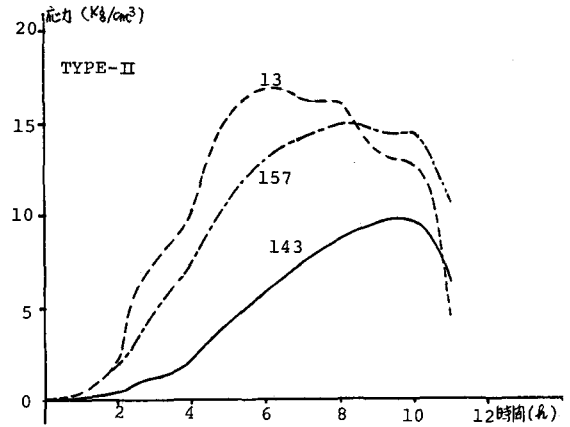


図-10 横断方向の応力の時間変化 (タイプ2)

図-9～11は、舗装の横断方向の応力 (σ_x) を3つの三角形に注目して、時間変化で整理したものである。三角形要素番号13はセンタラインのすぐ脇の表面、157は外側線のすぐ内側の表面、143は外側線より約40cm内側で、且つ表面より9cm下にある要素をそれぞれ示している。これらの図によると、境界条件が異なることにより各要素に発生する応力は著しく異なる。タイプ1の境界条件を持つ舗装構造では、センタライン近くの表面の応力が、6時間までは他の要素のそれよりも若干大きいものの、それ以後では舗装の内部にある143番の要素の応力かしだいに大きくなり、この要素の応力が他のそれよりも著しく大きくなり破壊に至っている。このため、13番の応力が著しく減少する。一方157番の応力は、ほとんど変化しない。

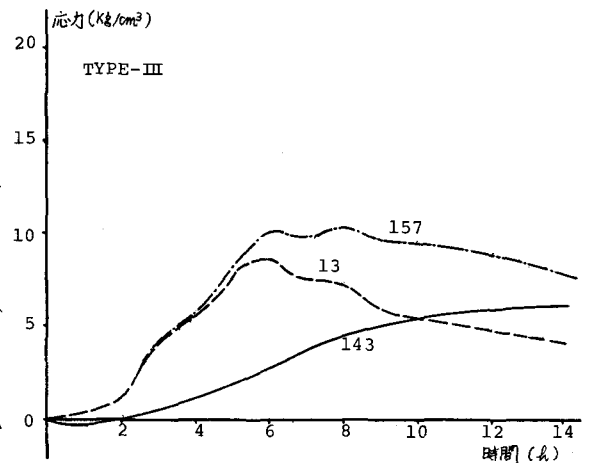


図-11 横断方向の応力の時間変化 (タイプ3)

タイプ2の境界条件を持つ舗装構造では、表面にある2つの三角形要素に生ずる応力が内部にあるそれよりも著しく大きい。とくに中心線近くの13の要素に生ずる応力は6時間で極大値を持ち、その後、徐々に減少する。タイプ1の境界条件とタイプ2の境界条件とを比較すると、厚さが変化している部分の縦の所が自由と固定の違いがあるだけで、他の境界条件は全く同一である。図-9、10より13の要素の応力は、両者とも6時間くらいまでは全く同一であるのに対し、143、157の要素の応力は、境界条件のわずかな違いにもかかわらず、著しく異なる。

タイプ3の境界条件を持つ舗装構造に生ずる応力は、タイプ1およびタイプ2の境界条件を持つそれよりも、全体に著しく小さい。舗装表面の13と157の応力を比較すると、4時間までは両者の応力は全く同一であ

るが、それ以後15%の応力が次第に大きくなる。このタイプの境界条件を持つ舗装構造では、主応力の大きさが 20 kg/cm^2 を越えないため、どの要素も破壊しない。

8. 舗装の破壊

タイプ1の場合の舗装構造の破壊の進行状態は、図-12～14に各時間ごとに示す。この場合は、外側線より40 cm 離れ、深さが10 cm ぐらいにある個所の破壊が進行し、しばらく時間が経過した後、急激に舗装の表面まで亀裂が進行する。

タイプ2の場合の舗装構造の破壊の進行状態は、図-15～16に示す。この場合は舗装の厚みの変わった底部から亀裂が進行し、表面に至る。

以上より、タイプ3の境界条件を持つ舗装構造以外のものは、亀裂が底部より進行する。

4. 結論

以上で得られた結論を要約すると以下のとおりである。

- 1) 舗装下面の境界条件が異なると、応力分布は著しく異なる。
- 2) 舗装の亀裂が底部より進行することがある。
- 3) 舗装の縦断方向の亀裂は、外側線の付近に生ずると思われる。

本研究の計算にあたり鷺巣慎氏の協力を得た。ここに感謝の意を表す。

なお、この計算は北大大型計算機 HITAC M-180 を使用した。

参考文献

1. 森吉, 深井, 鷺巣, 菅原: 舗装体の二次元の熱応力に関する研究(第3報) 土木学会北海道支部論文報告集, 第35号, 1978, P317~322

2. 鷺巣, 森吉, 深井, 菅原: 舗装体の二次元の熱応力 土木学会北海道支部論文報告集, 第33号, 1976, P311~314

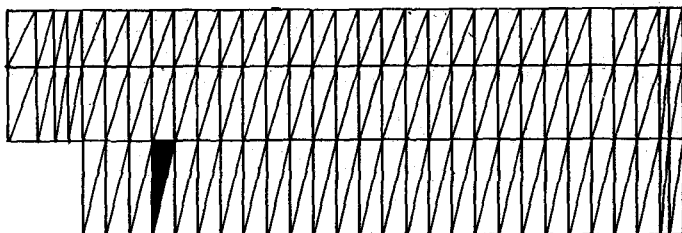


図-12 舗装の破壊状況 (8時間, タイプ1)

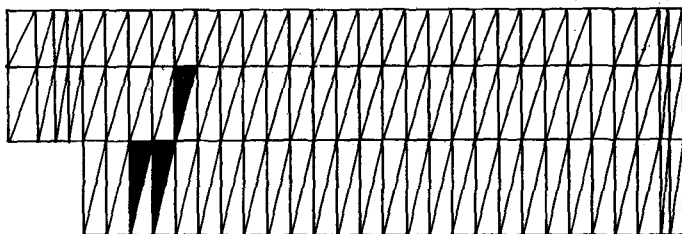


図-13 舗装の破壊状況 (9.5時間, タイプ1)

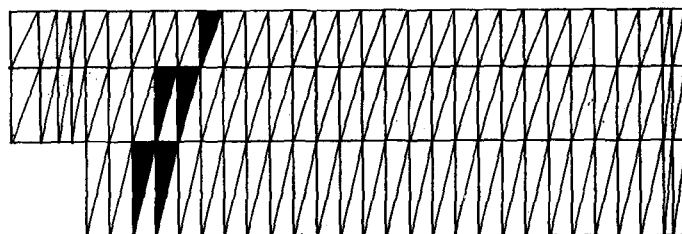


図-14 舗装の破壊状況 (10時間, タイプ1)

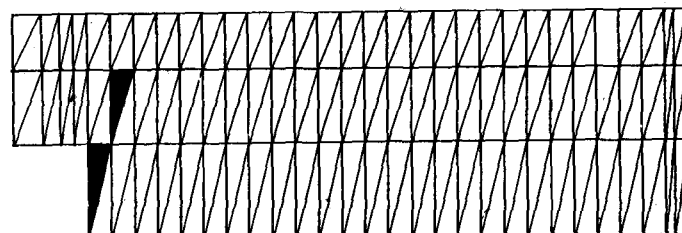


図-15 舗装の破壊状況 (11時間, タイプ2)

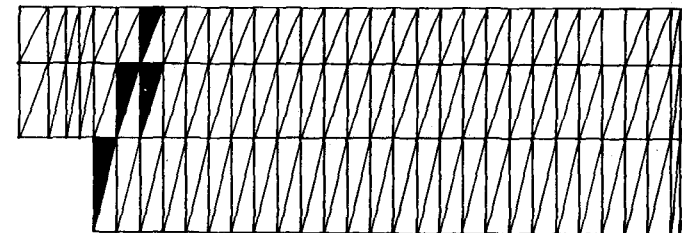


図-16 舗装の破壊状況 (11.5時間, タイプ2)